

## METODA POŚREDNIA POMIARU PRZECIEKU W INSTALACJI SPRĘŻONEGO POWIETRZA

Ryszard DINDORF<sup>1</sup>, Piotr WOŚ<sup>2</sup>

1. Politechnika Świętokrzyska, Katedra Urządzeń Mechatronicznych, Wydział Mechatroniki i Budowy Maszyn, al. Tysiąclecia Państwa Polskiego 7, 25-314 Kielce  
tel.: 41 34 24 481, e-mail: dindorf@ty.kielce.pl
2. Politechnika Świętokrzyska, Katedra Urządzeń Mechatronicznych, Wydział Mechatroniki i Budowy Maszyn, al. Tysiąclecia Państwa Polskiego 7, 25-314 Kielce  
tel.: 41 34 24 532, e-mail: wos@tu.kielce.pl

**Streszczenie:** W pracy przedstawiono metodę pośrednią pomiaru natężenia przecieku w instalacji sprężonego powietrza przy wykorzystaniu urządzenia pomiarowego włączonego na odgałęzieniu rurociągu. Zaproponowana metoda pośrednia polega na określaniu relacji między przeciekiem w instalacji pneumatycznej a przepływem kontrolowanym przez zawór dławiący nastawialny. Przeciek sprężonego powietrza w instalacji pneumatycznej jest obliczany na podstawie pomiaru stosunku ciśnienia w dwóch przedziałach czasu – z uwzględnieniem i bez uwzględnienia przepływu kontrolowanego.

**Słowa kluczowe:** urządzenie pomiarowe przecieku, natężenie przecieku, przeciek kontrolowany, system sprężonego powietrza.

### 1. WPROWADZENIE

W pracy przedstawiono metodę pośredniego pomiaru przecieku sprężonego powietrza w instalacji pneumatycznej przy wykorzystaniu urządzenia pomiarowego włączonego na odgałęzienie rurociągu. Zaproponowana metoda pomiaru opiera się na określeniu relacji między przeciekiem w instalacji pneumatycznej a przepływem kontrolowanym, na podstawie pomiaru spadków ciśnienia w dwóch przedziałach czasu. W metodzie tej wymagany jest przepływomierz do kontrolowanego pomiaru przepływu przez zawór dławiący nastawialny. Zaproponowana metoda pomiaru przecieku w instalacji pneumatycznej, w odróżnieniu od powszechnie stosowanych metod pośrednich, nie wymaga znajomości parametrów zbiornika, ani sprężarki.

### 2. METODA POŚREDNIA POMIARU PRZECIEKU

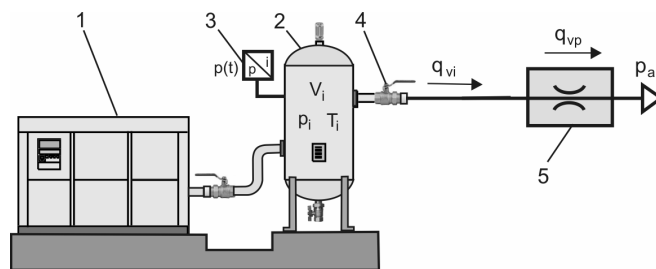
W instalacji pneumatycznej określa się dopuszczalny ilościowy przeciek w wartościach przepływu objętościowego lub procentowy przeciek w odniesieniu do wydajności sprężarki. Do oszacowania przecieku w instalacji sprężonego powietrza stosuje się metodę bezpośredniego pomiaru przecieku za pomocą przepływomierza oraz metody pośredniego pomiaru przecieku [1], [2], [3]. Najprostszą metodą obliczenia przecieku w instalacji pneumatycznej jest pomiar spadku ciśnienia w zbiorniku przy wyłączonej sprężarce. Schemat ideowy takiego układu pomiarowego metodą opróżniania zbiornika zamieszczono, na rysunku 1.

Metoda ta zalecana do pomiaru przecieku w instalacji pneumatycznej, której objętości nie jest większa niż 10% objętości zbiornika  $V_z$ .

Przy określaniu masowego natężenia przepływu  $q_m$  sprężonego powietrza w wyniku spadku ciśnienia stosuje się wzór na strumień masowy  $q_m$  podczas politropowego rozprężania w obszarze kontrolnym [4]:

$$q_m = \frac{V}{nRT} \frac{dp}{dt} \quad (1)$$

gdzie:  $V$  – objętość obszaru kontrolnego,  $T, p$  – temperatura absolutna i ciśnienie absolutne sprężonego powietrza,  $R$  – indywidualna stała gazowa powietrza,  $n$  – wykładnik przemiany politropowej.



Rys. 1. Pomiar przecieku w instalacji pneumatycznej metodą opróżniania zbiornika: 1 – sprężarka, 2 – zbiornik, 3 – przetwornik ciśnienia, 4 – zawór odcinający przepływ, 5 – odbiornik sprężonego powietrza (miejsce przecieku sprężonego powietrza)

Spadek ciśnienia  $dp/dt$  sprężonego powietrza w instalacji pneumatycznej występuje przy niezmienniej temperaturze w czasie  $T_i = \text{idem}$ . W takim przypadku uzasadnione jest przyjęcie procesu izotermicznego, dla której  $n = 1$ , oraz zapisanie wzoru na masowe natężenie przepływu  $q_{mi}$  w następującej postaci:

$$q_{mi} = \frac{V_i}{RT_i} \frac{dp_i}{dt} \quad (2)$$

a następnie określenie objętościowego przepływu  $q_{vi}$ :

$$q_{vi} = \frac{q_{mi}}{\rho_i} = \frac{V_i}{\rho_i R T_i} \frac{dp_i}{dt} = \frac{V_i}{p_i} \frac{dp_i}{dt} \quad (3)$$

gdzie:  $V_i$  – objętość instalacji pneumatycznej,  $p_i$  – ciśnienie absolutne,  $T_i$  – temperatura absolutna,  $\rho_i$  – gęstość powietrza.

W przypadku, gdy sprężarka i wszystkie odbiorniki są wyłączone, wtedy natężenia przepływu  $q_{vp}$  przez miejsca przecieku sprężonego powietrza wynoszą:

$$q_{vp} = q_{vi} \quad (4)$$

Metoda pomiaru przecieku w instalacji pneumatycznej „metodą opróżniania zbiornika” opiera się na założeniu, że utrzymuje się stałe natężenie przecieku  $q_{vp}$ . Takie założenie jest uzasadnione dla przepływu nadkrytycznego, gdy  $0,125 \leq p_d/p \leq 0,5283$ , oraz gdy ekwiwalentna średnica nieszczelności  $d_n \ll 1$  mm. Wartość stosunku ciśnień  $p_d/p = 0,125$  określa się dla maksymalnego ciśnienia absolutnego  $p = 0,8$  MPa w instalacji, gdy ciśnienie atmosferyczne  $p_a \approx 0,1$  MPa, a  $\beta = 0,5283$  jest krytycznym stosunkiem ciśnień. Straty mocy  $P_L$  wynikające z wycieku sprężonego powietrza przez nieszczelności w instalacji oblicza się według wzoru [5].

### 3. POMIAR PRZECIEKU Z KONTROLOWANYM PRZEPLYWEM NA ODGAŁĘZIENIU

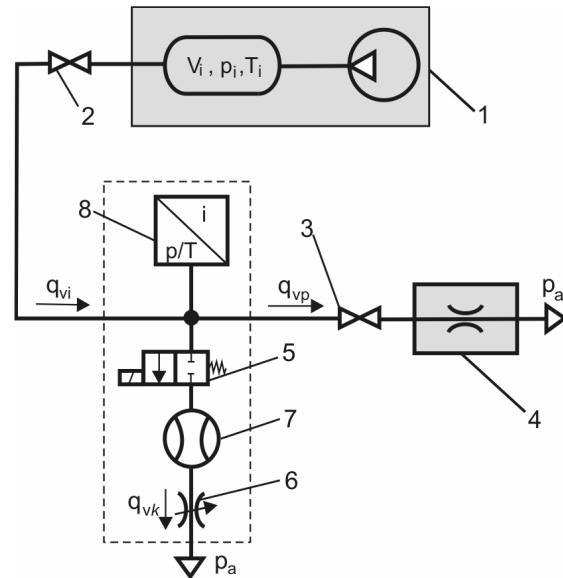
Zaproponowano metodę pośrednią pomiaru przecieku sprężonego powietrza w instalacji pneumatycznej przy wykorzystaniu urządzenia pomiarowego włączanego na odgałęzieniu rurociągu. Ta metoda pomiaru opiera się na określeniu relacji między przeciekiem w instalacji pneumatycznej (połączeniach, zaworach, odbiornikach), a przepływem kontrolowanym na odgałęzieniu rurociągu. Natężenie przecieku sprężonego powietrza przez nieszczelności w instalacji pneumatycznej oblicza się na podstawie pomiaru ciśnienia w dwóch przedziałach czasu. Pomiary spadków ciśnienia w instalacji pneumatycznej można przeprowadzić w dwóch dowolnych przedziałach czasowych: dla przecieku przez nieszczelności z uwzględnieniem przepływu kontrolowanego i dla przecieku przez nieszczelności bez uwzględnienia przepływu kontrolowanego. Poglądowy schemat układu pomiarowego przecieku z przepływem kontrolowanym na odgałęzieniu rurociągu zamieszczono na rysunku 2.

Pomiar przecieku sprężonego powietrza w instalacji pneumatycznej metodą pośrednią z kontrolowanym przepływem na odgałęzieniu rurociągu przeprowadza się następująco:

- Pomiar przecieku w instalacji sprężonego powietrza przeprowadza się wówczas, gdy wyłączona jest sprężarka (instalacja pneumatyczna jest pod ciśnieniem zbiornika sprężonego powietrza) 1, oraz gdy nie ma poboru sprężonego powietrza w odbiorniku pneumatycznym 4.
- Metoda pomiaru przecieku opiera się na określeniu relacji między przeciekiem  $q_{vp}$  sprężonego powietrza w odbiorniku pneumatycznym 4 a przepływem  $q_{vk}$  przez zawór dławiący nastawialny 6, kontrolowanym (mierzonym) za pomocą przepływomierza 7.
- Przez zmianę nastawy zaworu 6 można dostosować przepływ kontrolowany  $q_{vk}$  do zakresu natężenia

przepływu (przecieku)  $q_{vp}$  przez nieszczelności występujące w instalacji sprężonego powietrza, a także dobrać przepływ przez zawór 6 do zakresu pomiarowego przepływomierza 7.

- Pomiar temperatury  $T$  wykorzystuje się do przeliczenia wyników pomiaru przepływu objętościowego lub masowego dla znormalizowanej atmosfery odniesienia ANR (*Atmosphere Normale de Reference*). Temperatura sprężonego powietrza w instalacji pneumatycznej odpowiada temperaturze otoczenia.

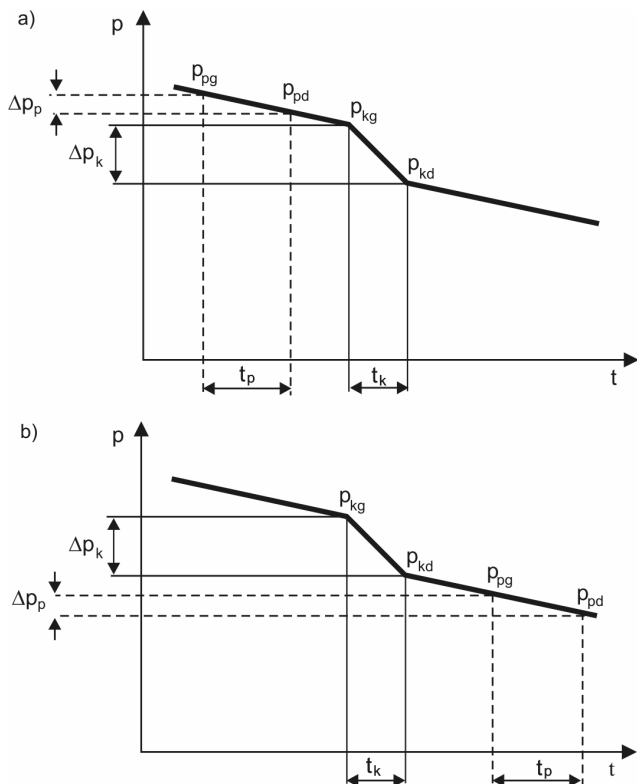


Rys. 2. Poglądowy schemat układu pomiarowego przecieku z przepływem kontrolowanym: 1 – stacja sprężarki, 2, 3 – zawór odcinający, 4 – odbiornik sprężonego powietrza (miejsca przecieku), 5 – zawór przełączający 2/2 sterowany elektromagnetycznie, 6 – zawór dławiący nastawialny, 7 – przepływomierz, 8 – podwójny przetwornik pomiarowy ciśnienia i temperatury

W metodzie pośredniej pomiaru przecieku z przepływem kontrolowanym na odgałęzieniu rurociągu uwzględnia się dwa przedziały pomiarowe spadku ciśnienia  $p(t)$ :  $\Delta p_p$  i  $\Delta p_k$ , widoczne na rysunku 3. Pomiary spadków ciśnienia  $\Delta p_p$  i  $\Delta p_k$  można przeprowadzać w dowolnej kolejności i w różnych przedziałach czasowych, jak przedstawiono na rysunku 3a i rysunku 3b.

Jak wynika z rysunku 3a:

1. Pierwszy przedział pomiarowy jest pomiarem przecieku bez przepływu kontrolowanego, gdy zawór przełączający 5 jest w pozycji przepływ odcięty. W czasie  $t_p$  występuje spadek ciśnienia  $\Delta p_p$ , wynikający z różnicy ciśnienia górnego  $p_{pg}$  i ciśnienia dolnego  $p_{pd}$ , spowodowany przeciekiem sprężonego powietrza w urządzeniu pneumatycznym 4.
2. Drugi przedział pomiarowy jest pomiarem przecieku z przepływem kontrolowanym, gdy zawór przełączający 5 jest w pozycji przepływ otwarty. W czasie  $t_k$  występuje spadek ciśnienia  $\Delta p_k$ , wynikający z różnicy ciśnienia górnego  $p_{kg}$  i ciśnienia dolnego  $p_{kd}$ , spowodowany przeciekiem sprężonego powietrza w instalacji pneumatycznej 4 oraz przepływem sprężonego powietrza do atmosfery przez zawór dławiący nastawialny 6. W czasie  $t_k$  mierzy się przepływomierzem 7 przepływ objętościowy przez zawór dławiący nastawialny 6.



Rys. 3. Spadki ciśnienia w dwóch przedziałach czasu w metodzie pomiaru przecieku z przepływem kontrolowanym

W zastosowanej metodzie pomiaru przecieku w instalacji pneumatycznej uwzględnia się równania bilansu natężeń przepływu dla dwóch przedziałów pomiarowych ciśnienia, które zapisuje się według wzoru (3) następująco:

$$\begin{cases} \frac{V_i}{p_p} \frac{dp_p}{dt_p} = q_{vp} \\ \frac{V_i}{p_k} \frac{dp_k}{dt_k} = q_{vp} + q_{vk} \end{cases} \quad (5)$$

gdzie:  $p_p$  – ciśnienie mierzone w przedziale pomiaru przecieku bez przepływu kontrolowanego,  $p_k$  – ciśnienie mierzone w przedziale pomiaru przecieku z przepływem kontrolowanym,  $t_p$  – czas pomiaru przecieku bez przepływu kontrolowanego,  $t_k$  – czas pomiaru przecieku z przepływem kontrolowanym,  $q_{vp}$  – sumaryczne natężenie przepływu objętościowego przez nieszczelności w instalacji pneumatycznej,  $q_{vk}$  – natężenie przepływu objętościowego mierzone przez zawór nastawialny w czasie  $t_k$ .

Ponieważ przepływ przez nieszczelności w instalacji przemysłowej jest niestabilny (zmienny w czasie), dlatego równania różniczkowe (5) przekształcono za pomocą funkcji logarytmicznych do postaci:

$$\begin{cases} V_i \frac{\ln\left(\frac{p_{pg}}{p_{pd}}\right)}{t_p} = q_{vp} \\ V_i \frac{\ln\left(\frac{p_{kg}}{p_{kd}}\right)}{t_k} = q_{vp} + q_{vk} \end{cases} \quad (6)$$

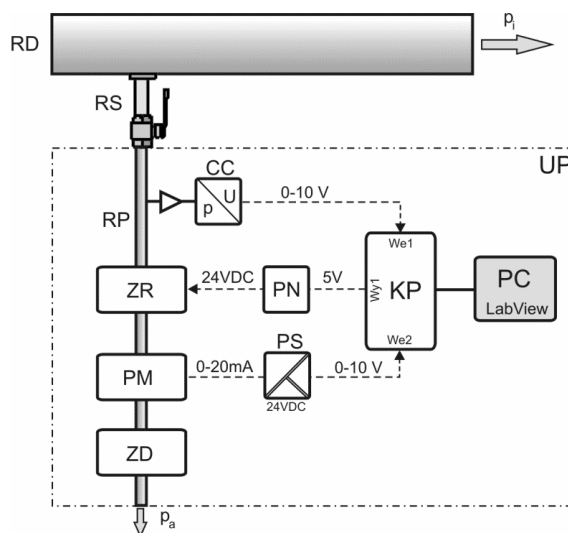
gdzie:  $p_{pg}, p_{pd}$  – ciśnienie górne i dolne w zakresie pomiaru przecieku bez przepływu kontrolowanego,  $p_{kg}, p_{kd}$  – ciśnienie górne i dolne w zakresie pomiaru przecieku z przepływem kontrolowanym.

Po przekształceniu równania (6) otrzymano wzór do obliczania przecieku (natężenia przepływu) objętościowego w instalacji pneumatycznej metodą pośrednią z przepływem kontrolowanym na odgałęzieniu rurociągu, na podstawie pomiaru stosunku ciśnień w dwóch przedziałach czasowych:

$$q_{vp} = q_{vk} \frac{\ln\left(\frac{p_{pg}}{p_{pd}}\right) t_k}{\ln\left(\frac{p_{kg}}{p_{kd}}\right) t_p - \ln\left(\frac{p_{pg}}{p_{pd}}\right) t_k} \quad (7)$$

#### 4. UKŁAD POMIAROWY

Do monitorowania przecieków w instalacji sprężonego powietrza metodą pomiaru z przepływem kontrolowanym na odgałęzieniu rurociągu zbudowano mobilne urządzenie pomiarowe, którego schemat pomiarowy przedstawiono rysunek 4. Na rysunku tym wprowadzono następujące oznaczenia: RD – rura dystrybucyjna i RS – rura serwisowa instalacji, UP – układ pomiarowy, w którym: RP – rura pomiarowa, CC – czujnik ciśnienia PE5-PP-GO14 0-10 bar Rexroth, ZR – zawór rozdzielający 3/2 NZ G1/2" 24VDC sterowany elektromagnetycznie, PN – przetwornica podwyższająca napięcie 5V/24VDC, PM – przepływomierz masowy SONOAIR DN15 G1/2", PS – przetwornik sygnałowy LUPS-11ME-00, ZD – nastawialny zawór dławicy, KP – karta pomiarowa USB-1209FS, PC – komputer z LabView.

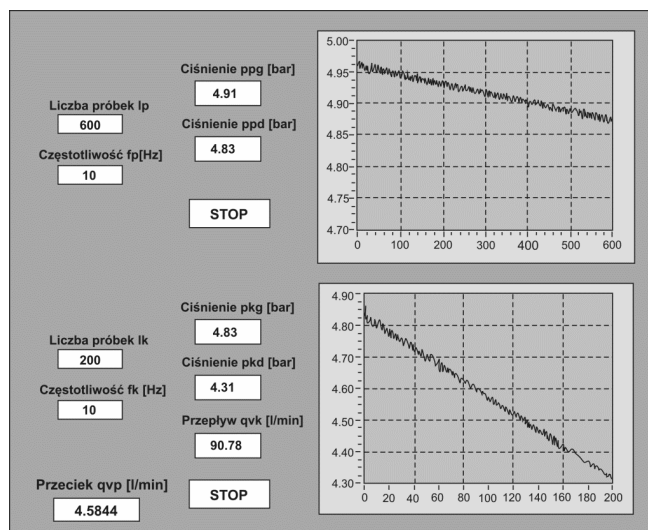


Rys. 4. Schemat układu pomiarowego przecieku w instalacji sprężonego powietrza metodą pośrednią z przepływem kontrolowanym

#### 5. WYNIKI POMIARU

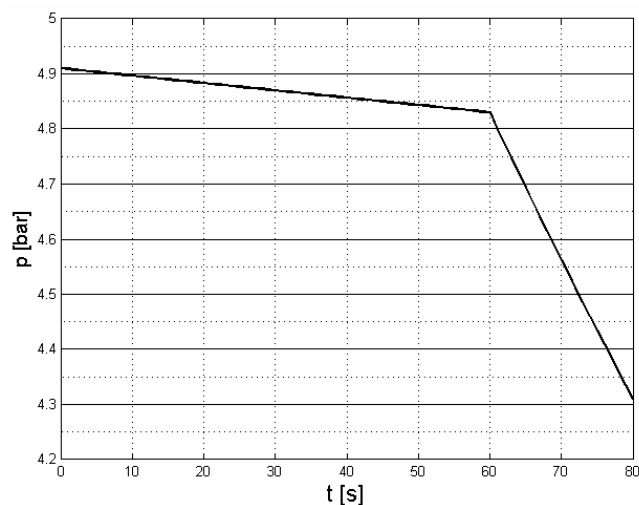
Widok panelu operatorskiego w programie LabView z wynikami pomiaru przecieku w instalacji sprężonego powietrza przedstawiono na rysunku 5. Na panelu widoczne są dwa okna pomiarowe ciśnienia: górne dla pierwszego przedziału pomiarowego bez przepływu kontrolowanego, dolne dla drugiego przedziału pomiarowego z przepływem

kontrolowanym. W programie LabView rejestrowane są górne i dolne wartości ciśnienia w dwóch przedziałach pomiarowych oraz przepływ objętościowy przez zawór dławiący.



Rys. 5. Widok panelu operatorskiego w programie LabView z wynikami i wykresami pomiarów

Na podstawie wartości wyników pomiarowych ciśnienia, widocznych na panelu LabView rysunku 5, narysowano wykres zmiany ciśnienia w funkcji czasu  $p(t)$  w dwóch przedziałach pomiarowych, który zamieszczono na rysunku 6.



Rys. 6. Wykres zmiany ciśnienia w dwóch przedziałach pomiarowych

Po zakończeniu pomiarów obliczane jest natężenie przecieku według wzoru (7). W czasie pomiarów zaobserwowano, że po przesterowaniu (przełączeniu zaworu za pomocą sygnału elektrycznego) zaworu rozdzielającego, przy przejściu z pierwszego do drugiego przedziału pomiarowego, powstają zakłócenia ciśnienia charakteryzujące się impulsem (skokiem) ciśnienia:  $\Delta p \approx 0,05$  bar.

## 6. WNIOSKI KOŃCOWE

Zaproponowana metoda pośrednia pomiaru przecieku na odgałęzieniu rurociągu instalacji pneumatycznej, w odróżnieniu od powszechnie stosowanych metod pośrednich, nie wymaga znajomości parametrów zbiornika i sprężarki. Metoda ta może być stosowana do pomiaru natężenia przecieku w dowolnym miejscu instalacji sprężonego powietrza: w rurociągu głównym i dystrybucyjnym, przewodach rozprowadzających i przyłączeniowych, do odbiorników (maszyn, urządzeń, narzędzi). Zastosowanie tej metody zmniejsza koszty pomiaru przecieku w instalacji pneumatycznej, ponieważ nie wymagany jest demontaż lub przeróbka rurociągu, wystarczy podłączyć urządzenie pomiarowe w dowolnym miejscu instalacji pneumatycznej przez zawór kulowy lub punkt poboru sprężonego powietrza. Przedstawiona metoda pomiaru natężenia przecieku ma istotne znaczenie do oszacowania strat energii i kosztów eksploatacji systemów sprężonego powietrza. Metod ta może być również stosowana do pomiaru przecieku w innych instalacjach gazowych niż na sprężone powietrze.

## 7. BIBLIOGRAFIA

1. Dindorf R., Woś P.: Measurement methods of compressed air leakage for pneumatic system. *Hydraulica a Pneumatica*, No. 3, 2012, p. 1-5 (Slovak Republic).
2. Dindorf R., Woś P., Mazur S.: Pośrednie metody pomiaru przecieków sprężonego powietrza. *Hydraulika i Pneumatyka*, Nr 3, 2012, s. 8-12.
3. Dindorf R., Mazur S., Woś P.: Nowe metody pomiaru przecieku w systemach sprężonego powietrza. *Pomiary Automatyka Kontrola*, Nr 6, 2013, s. 566-569.
4. Dindorf R.: Napędy płynowe. Podstawy teoretyczne i metody obliczania napędów hydrostatycznych i pneumatycznych. Podręcznik akademicki. Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej. Kielce 2009.
5. Dindorf R. Estimating potential energy savings in compressed air systems. *Procedia Engineering*. Science Direct Elsevier, Vol. 39C, 2012, pp.204-211.

## INDIRECT MEASUREMENT METHOD OF LEAKAGE FLOW RATE IN COMPRESSED AIR SYSTEMS

In the paper the indirect measurement method of air leakage flow rate in compressed air system was proposed. In this method the measurement equipment had branch connection to the pneumatic pipeline. The indirect measurement method consists in determining the relation between air leakage flow rate in pipeline and the controlled air flow rate through adjustable throttle valve. Compressed air leakage flow rate in pneumatic systems is calculated on the basis of pressure ratio measurements in two time intervals - during leakage with and without the controlled flow.

**Keywords:** leakage measurement equipment, leakage flow rate, controlled air flow, compressed air systems.